

## Redaktion

K. Markstaller, Mainz  
 S. Wirtz, Hamburg

O. Schedler<sup>1</sup> · U. Kleemann<sup>2</sup> · H. Handschak<sup>1</sup> · M. Hensel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Luftrettungsstation Senftenberg

<sup>2</sup> Bereich Rettungsdienst, Klinikum Niederlausitz GmbH, Senftenberg

<sup>3</sup> Klinik für Anästhesiologie und operative Intensivmedizin,  
 Universitätsmedizin Charite, Berlin

# Das Liquid-Oxygen-System (LOX)

## Neues System für Transport und Applikation von Sauerstoff in der Luftfahrt

Die Sauerstoffapplikation stellt im Luftverkehr ein bedeutendes Element der Sicherheit dar. Im Luftrettungsdienst, insbesondere im Intensivtransport, ist Sauerstoff darüber hinaus ein unverzichtbarer Bestandteil der Therapie. Obwohl sich die Gaszusammensetzung bis in größere Höhen nicht ändert, nimmt der Atmosphärendruck mit zunehmender Flughöhe ab. Dadurch fällt der Partialdruck für Sauerstoff, was zu einer hypoxischen Hypoxie führen kann.

Sauerstoff wird bisher in eisernen Druckbehältern mit einem Betriebsdruck von 200 bar gespeichert. Alternativ kann die eiserne Druckflasche durch Karbonflaschen ersetzt werden, was für den Flugbetrieb einen wesentlichen Faktor hinsichtlich der Gewichtsrechnungen darstellt. Weiterhin besteht bei den Karbonflaschen die technische Möglichkeit, den Betriebsdruck der Sauerstoffflaschen auf 300 bar zu erhöhen. Aus dem vorhandenen Volumen und der möglichen Kompression ergibt sich die Verfügbarkeit von Sauerstoff in gasförmiger Form. In einer mit 200 bar komprimierten 3 l Sauerstoffflasche (4,8 kg) stehen 600 l gasförmiger Sauerstoff zur Verfügung. Bei einem Frischgasfluss von 10 l/min bedeutet das eine Gasreserve von einer Stunde. Für die Luftrettung ist das eine unzureichende Menge, weshalb größere oder mehrere Druckgasflaschen mitzuführen sind.

### Flüssigsauerstoffsystem

Das 10-l-Flüssigsauerstoffsystem Aero ORB® Ready to install (RTI) wurde für den Einsatz an Bord von Hubschraubern konzipiert und dient der Speicherung von Sauerstoff in flüssiger Form und der Applikation im gasförmigen Zustand. Flüssigsauerstoff („liquid oxygen“) ist eine blassblaue, wasserähnliche Flüssigkeit mit einem Siedepunkt von  $-182,78^{\circ}\text{C}$ . Bei Atmosphärendruck (760 mmHg im Meeresspiegelniveau) ist Flüssigsauerstoff 1,14-mal schwerer als Wasser und wiegt 2,5123 Pounds (1,26 kg) pro Liter. Ein Liter Flüssigsauerstoff dehnt sich während der Aggregatzustandsände-

rung bei  $21^{\circ}\text{C}$  und einem Atmosphärendruck von 760 mmHg auf 860 l Gas aus. Der beim Aggregatübergang entstehende Druck ist der Nennbetriebsdruck und beträgt maximal 70 psi (4,8 bar). Durch den in der Zufuhrleitung eingebauten Druckregler wird das System Sauerstoff mit einem Druck von 50 psi (3,4 bar) liefern.

### ► Ein Liter Flüssigsauerstoff dehnt sich bei $21^{\circ}\text{C}$ auf 860 l Gas aus

Der Sauerstofftank ist ein doppelwandiger, vakuumisolierter, kugelförmiger Druckbehälter mit einem kombinierten Füll-, Druck-

**Tab. 1** Sauerstoffmessung im Standbymodus des LOX-Systems

Messzeit	Sauerstoffkonzentration [%]			
[min]	LOX-Behälter	Assistentenplatz	Arztplatz	Patiententrage
T1	22	21	21	21
T2	23	21	21	21
T3	23	21	21	21
T4	23	22	21	21
T5	23	22	22	21

**Tab. 2** Sauerstoffkonzentrationen im GAS-Betriebsmodus

Messzeit	Flow	Sauerstoffkonzentration [%]			
[min]	[l/min]	GAS-System	Assistentenplatz	Arztplatz	Patiententrage
T1	4	21	21	21	22
T2	6	22	21	21	22
T3	8	22	21	21	22
T4	12	22	22	22	22
T5	15	23	22	22	22

aufbau- und Entlüftungsventil, einem Druckventil, 2 Überdruckventilen, einer Bertsscheibe, einem Druckregler, einem Magnetschalter und einer elektronischen Füllstandanzeige. Um das System zu füllen, wird das Serviceventil an das kombinierte Ventil angeschlossen. Das System schaltet dabei automatisch in den Füll-Entlüftungsmodus, wodurch flüssiger Sauerstoff in den Behälter gelangt und den gasförmigen Sauerstoff verdrängt. Dieser wird an die Atmosphäre abgegeben.

Im Betriebsmodus wird flüssiger Sauerstoff in einen Wärmetauscher geleitet. Dieser Luft-Flüssigkeits-Wärmetauscher leitet Wärme aus der Umgebungsluft in den zugeführten flüssigen Sauerstoff, um diesen bei Umgebungstemperaturen (21,1°C) zu verdampfen. Die Kapazität des Wärmetauschers wird durch die Gasdurchflussrate bestimmt. Mittels zusätzlichem Gebläse kann eine maximale Gasdurchflussrate vom 100 l Sauerstoff pro Minute von -183°C auf -6,67°C erwärmt werden.

In einer Anwendungsbeobachtung wurde die Funktion von Aero ORB® RTI Liquid oxygen (LOX) im Luftrettungsdienst getestet und zusätzlich Sauerstoffkonzentrationsmessungen am LOX-System und in der Hubschrauberkabine durchgeführt. Untersuchungsschwerpunkt war die Erfassung der Konzentration des durch die physikalischen Prozesse verdunstenden Sauerstoff und deren Konzentrationserfassung in der Hubschrauberkabine.

## Material und Methoden

Zur Untersuchung wurde ein Hubschrauber vom Typ BK 117 C-2 (EC 145) der ADAC Luftrettung vom Standort Senftenberg genutzt. In der Druckflaschenstandardbestückung waren 4 Sauerstoffflaschen à 3 l mit je 200 bar Betriebsdruck vorhanden. Im Vergleich wurde das Aero ORB® RTI Liquid-oxygen-System (LOX) installiert. Die Kompatibilitätserklärungen erfolgten durch Aerolite Max Bucher AG, Ennetbürgen, Schweiz. Die **Abb. 1** zeigt den Druckbehälter in seiner Verankerung im Hubschrauber. Die Befüllung des Druckbehälters erfolgt mittels externer 45 l Flüssigsauerstoffanlage. Während der Befüllung wird das Gewicht bestimmt und mit der vorhandenen LED-Anzeige am LOX-System verglichen. Die Menge des Sauer-

## Zusammenfassung · Abstract

Notfall Rettungsmed 2007 · 10:32–36 DOI 10.1007/s10049-006-0878-z  
© Springer Medizin Verlag 2007

O. Schedler · U. Kleemann · H. Handschak · M. Hensel

### Das Liquid-Oxygen-System (LOX). Neues System für Transport und Applikation von Sauerstoff in der Luftfahrt

#### Zusammenfassung

Durch Sauerstoffkonzentrationsmessungen (Oximeter Oxydig Dräger, Lübeck) im Hubschrauber EC 145 wurden 2 Sauerstofftransport- und Applikationssysteme verglichen. In einer Anwendungsbeobachtung wurde das neue Flüssigsauerstoffsystem (LOX) zur Sauerstofftherapie eingeschätzt. Die Messungen zeigen, dass aus physikalischen Gründen flüssiger Sauerstoff während der Standby-Phase verdunstet und am Auslassventil eine gegenüber der Atmosphäre erhöhte Konzentration (22,8% O<sub>2</sub>) entsteht. Demgegenüber wurde beim herkömmlichen Druckflaschengassystems (GAS) im Betriebsmodus eine höhere Sauerstoffkonzentration (22,7% O<sub>2</sub>) ge-

messen. Innerhalb der Hubschrauberkabine (HEMS, PAX) konnte im Vergleich beider Sauerstoffsysteme keine erhöhte Konzentration gemessen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass LOX ein sicheres Niederdrucksystem (3,4 bar) für den Transport und die Applikation von Sauerstoff mit einer sehr großen Reserve für den luftgebundenen Intensivtransport ist.

#### Schlüsselwörter

Flüssigsauerstoff · Luftrettung · Hypoxie · Sauerstofftherapie · Niederdrucksystem

### Liquid oxygen system: A new system for transport and application of oxygen in air rescue

#### Abstract

By oxygen concentration measurements (Oximeter Oxydig Dräger, Lübeck) in the EC 145 helicopter two oxygen transport and application systems were compared. The new liquid oxygen system (LOX) for the oxygen therapy was assessed in an application observation. For physical reasons fluid oxygen evaporates during the stand-by phase and an increased concentration (22.8% O<sub>2</sub>) in the exhaust valve of LOX arises. On the other hand a high oxygen concentration (22.7% O<sub>2</sub>) was measured in the operation mode of the con-

ventional pressure flask gas system (GAS). No increased concentration could be measured within the helicopter cabin (HEMS, PAX) comparing both oxygen systems. For transport and application of oxygen with a very big reserve for the air dependent intensive transport the results show that LOX is a sure low pressure system (3.4 bar).

#### Keywords

Liquid oxygen · Air rescue · Hypoxia · Oxygen therapy · Low pressure oxygen system

**Tab. 3** Sauerstoffkonzentrationen im LOX-Betriebsmodus

Messzeit	Flow	Sauerstoffkonzentration [%]			
[min]	[l/min]	LOX-System	Assistentenplatz	Arztplatz	Patiententrage
T1	4	22	21	21	22
T2	6	21	21	21	22
T3	8	21	21	21	22
T4	12	21	21	22	22
T5	15	21	22	22	22

**Tab. 4** Sauerstoffkonzentrationsmessungen im Hauptstromverfahren

Messzeit [min]	Flow [l/min]	O <sub>2</sub> [%]
T1	4	41
T2	6	50
T3	8	52
T4	12	59
T5	15	79

**Tab. 5** Sauerstoffverlust während des Standby-Betriebes

Zeitraum nach Befüllung [h]	Restliche Flüssigsauerstoffmenge im Konverter [l]	Restmenge an gasförmigem Sauerstoff im Konverter [l]
0	10,0	8600
24	9,1	7826
48	7,9	6794
72	6,6	5676
96	5,3	4558

stoffvorrats ergibt sich aus dem Gesamtgewicht des LOX-Systems in Kilogramm.

Die Untersuchungen fanden außerhalb des Flugbetriebs statt. Zur Messung verwendeten wir in der geschlossenen Hubschrauberkabine ein Oximeter (Oxydig Typ 8304300) der Firma Dräger Medical Lübeck, dessen Betriebsbereitschaft durch Zweipunktkalibration (21% O<sub>2</sub> und 100% O<sub>2</sub>) hergestellt wurde. Die Messungen wurden während des Standby und während des Betriebs der Sauerstoffsysteme (Flow) ermittelt. Messorte waren am O<sub>2</sub>-Druckflaschenhauptreservoir (GAS), am LOX-Behälter (LOX), am Assistentenplatz (HEMS) und am Arztplatz (PAX) sowie an der Kopfposition der Patiententrage (PAS). Dabei waren der HEMS-Platz 90 cm, der PAX-Platz 120 cm und der PAS-Platz 150 cm vom GAS- bzw. LOX-System entfernt. Die Verhältnisse innerhalb der Kabine mit dem LOX-System zeigt **Abb. 2**.

Pro Messort fand ein 5-minütiger Messzyklus statt. Die Betriebsmessungen wurden mit einem Sauerstoffflow von 4, 6, 8, 12 und 15 l/min durchgeführt. Als Insufflationsort setzten wir ein Reservoir (Prüflunge) ein. Das Oximeter wur-

de während der Flowmessung mittels T-Stück an das Insufflationssystem konnektiert. Die Messwerte werden als Mittelwerte angegeben.

## Ergebnisse

### Standbymodus

Am Standarddruckflaschenhauptreservoir (GAS) entstand im Standby bei geschlossenen Ventilen an allen Messorten in der Hubschrauberkabine (EC 145) keine Veränderung der Sauerstoffkonzentration. Der Mittelwert für Sauerstoff betrug 21,2%.

An der Flüssigsauerstoffanlage (LOX) entstand im Standbymodus eine Sauerstoffkonzentrationserhöhung auf durchschnittlich 22,8%. Gegenüber den Messorten HEMS, PAX und PAS lag damit am LOX-Systemmessort ein höherer Messwert vor. Zu einer relevanten Erhöhung an dem Messorten HEMS, PAX und PAS kam es während der Standbyphase nicht. In **Tab. 1** sind die Messwerte im LOX-Standby-Modus dargestellt.

## Betriebsmodus

Im Betriebsmodus der Druckflaschengasversorgung (GAS) ergab sich im Bereich des Reservoirs eine Erhöhung der Sauerstoffkonzentration auf 22,7%. In der **Tab. 2** sind die Werte der Messungen des Druckflaschensauerstoffsystems aufgezeigt.

In der Betriebsmessphase lag der gemessenen O<sub>2</sub>-Wert der Flüssigsauerstoffanlage am System (LOX) unter denen in der Standbymeasurephase. Der durchschnittlich gemessene Wert im Betriebsmodus LOX betrug 21,1%. Die Werte aus den Betriebsmessungen des LOX-Systems werden in **Tab. 3** dargestellt. An der Patientenmessstelle (PAS) wurde während der Betriebsmessungen beider Systeme höhere Sauerstoffkonzentrationen erfasst.

Im Betriebsmodus wurden zwischen 4 und 15 l O<sub>2</sub>/min in das Reservoir appliziert. Am T-Stück zum geschlossenen Insufflationssystem entstanden gasflussabhängige Sauerstoffkonzentrationen. Die im Hauptstrom erfassten O<sub>2</sub>-Konzentrationen korrelierten mit der applizierten Sauerstoffmenge (**Tab. 4**). Der Pearson-Korrelationskoeffizient betrug  $r^2=0,96$ .

## Diskussion

Der Transport und die Applikation von Sauerstoff werden im Luftrettungsdienst anhand der Kerndaten wie Betriebsdruck, Gewicht und Sauerstoffkonzentrationen diskutiert.

Sauerstoff ist selbst nicht brennbar, fördert jedoch die Verbrennung aller brennbaren Stoffe. Dabei ist dieser Effekt von der Temperatur und dem Barometerdruck abhängig. Während des Flugs verringert sich der Atmosphärendruck mit zunehmender Höhe. Auch die Temperatur nimmt kontinuierlich pro Meter Höhe ab. Diese Faktoren stehen diesem verbrennungsfördernden Effekt generell entgegen.

Aero ORB® RTI ist ein geschlossenes System mit einem Fassungsvermögen von 8600 l gasförmigem Sauerstoff, welcher in einem thermoisolierten 10-l-Druckbehälter flüssig aufbewahrt wird. Gegenüber einer herkömmlichen Hochdruckflaschenanlage von 200 bar liegt der Nenndruck der LOX-Anlage bei maximal 4,8 bar. Ein Druckregler reduziert den Betriebsdruck

auf 3,4 bar. Das entspricht dem Standard-eingangsdruck medizinischer Ausrüstungen. Dadurch entstehen beim Transport von Sauerstoff im Hubschrauber mit dem LOX-System weniger Gefahren durch unerwünschte Gasdekompressionen.

Das Gewicht der gefüllten Flüssigsauerstoffanlage beträgt 34,5 kg und erreicht damit eine Zuladung von 20 kg gegenüber der herkömmlichen Druckflaschensystemen mit je 3-l-Flaschen (4,8 kg). Würde man die Menge des applizierbaren Sauerstoffs zur Grundlage der Gewichtsberechnungen machen, würde ein entsprechender Sauerstoffvorrat in Druckflaschen einem Gewicht von 72 kg entsprechen. Das Zuladungsgewicht von 20 kg durch das LOX-System stellt keine flugsicherheitstechnischen Besonderheiten in einer EC 145 dar.

## Austretender Sauerstoff

Flüssigsauerstoff hat eine extrem niedrige Temperatur ( $-182,78^{\circ}\text{C}$ ). Der doppelwandige, thermoisolierte Druckbehälter kann die Temperatur nur begrenzt aufrecht erhalten, sodass zeitabhängig ein Sauerstoffverlust eintritt. Der Sauerstoff entweicht über ein Außenventil in die Atmosphäre und führt im Standbymodus zur einer Sauerstoffkonzentrationserhöhung um 1,8% am LOX-Auslassventil. Der austretende flüssige Sauerstoff ist im Gegensatz zum Druckflaschensystem mit  $-6,7^{\circ}\text{C}$  klar und könnte im direkten Kontakt zu lokalen Irritationen führen. Beim Aggregatsübergang in den gasförmigen Zustand erwärmt sich Sauerstoff weiter. Nach unseren bisherigen Erfahrungen haben die Patienten die Sauerstoffzufuhr aus dem LOX-System auch im Hinblick auf die kühleren Sauerstofftemperatur ohne Nachteile gegenüber dem herkömmlichen Druckgasflaschensystem akzeptiert.

In **Tab. 5** wird die durchschnittliche Sauerstoffverdunstung an der Flüssigsauerstoffanlage angegeben [1].

Das Oximeter (Oxydig Typ 8304300) der Firma Dräger Medical Lübeck bestimmt die Konzentration von Sauerstoff durch langsame Sensoren. Die Messungen sind daher als statisch zu bezeichnen. Aussagen zu schnellen dynamischen Konzentrationsänderungen können mittels des verwendeten Messsystems nicht getroffen werden.

**Abb. 1** ► LOX-Druckbehälter im System an Bord einer EC 145



**Abb. 2** ► Liquid oxygen an Bord der EC 145 – Christoph 71 Senftenberg (ITH Brandenburg)



Die aufgezeigten Messergebnisse zeigen, dass im Betriebsmodus des LOX-Systems eine geringere Sauerstoffkonzentration (21,1%) gegenüber der Druckflaschenversorgung (22,7%) entsteht. Während in der Standbyphase aus physikalischen Gründen Sauerstoff aus dem LOX-System verdunstet (22,8%), führen auftretende Undichtigkeiten des Gasflaschensystems während der Betriebsphase zu einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration (22,7%). Eine relevante Erhöhung der Sauerstoffkonzentration in der Hubschrauberkabine konnte auch bei einem Maximalflow von 15 l  $\text{O}_2$ /min an den Messorten HEMS und PAX an beiden Systemen am Boden nicht gefunden werden.

## Das LOX-System kann medizintechnisch mit dem Gasflaschensystem verglichen werden

Da die erhobenen Konzentrationsänderungen mit langsamen Sensoren erhoben wurden und die Höhe der Änderungen

sowohl technisch als auch klinisch ohne Bedeutung sind, kann das LOX-System medizintechnisch mit dem Gasflaschensystem verglichen werden. Die Sauerstoffkonzentrationserhöhung am PAS-Messort korreliert mit der applizierten Menge von Sauerstoff in das Insufflationssystem und ist innerhalb der Sauerstoffsysteme vergleichbar.

## Vorteile des neuen Systems

Die Vorteile von LOX liegen für den Flugdienst in der großen Sauerstoffkapazität und dem dafür geringen Gewicht. Die Menge des verfügbaren Sauerstoff ist abhängig vom Atemminutenvolumen (AMV) und der Gasmischung ( $\text{F}_i\text{O}_2$ ) bzw. dem Gasfluss. Bei einem angenommenen Frischgasfluss von 10 l/min und einer  $\text{F}_i\text{O}_2$  von 100% würde theoretisch der Sauerstoffvorrat der Gasflaschen 3 h reichen, während die LOX-Anlage dafür etwa 15 h Reserven bietet.

Abgesehen von der unbedenklichen Anwendung an Bord von Hubschraubern



liegen auch die Kosten für den Flüssigsauerstoff deutlich unter den Kosten für vergleichbare Mengen gasförmigen Sauerstoffs in Druckflaschen. An den gasdruckbetriebenen Beatmungsgeräten waren unter LOX-Betrieb keine spezifischen Gerätefunktionsstörungen festzustellen.

## Fazit für die Praxis

**Sauerstoff fördert unter bestimmten Umständen die Verbrennung. Da im Luftrettungsbetrieb eher hypobare Umgebungsbedingungen herrschen, ist die Gefahr der Entflammbarkeit von Sauerstoff in Hubschraubern sehr gering. Der physikalisch bedingte Sauerstoffaustritt am Auslassventil des Flüssiggassystem LOX stellt daher für den Flugbetrieb keine Gefahr dar. Durch die deutliche Druckreduzierung des Systems von 200 bar auf 4,5 bar erhöht sich die Sicherheit von Transport und Applikation von Sauerstoff im Luftrettungsdienst deutlich. Gegenüber herkömmlichen Druckflaschenreservoirs kann mit dem LOX-System deutlich mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt werden. Das erhöht die Sicherheit sauerstofftherapieabhängiger Patiententransporte und ist für den Intensivtransport zu empfehlen.**

## Korrespondierender Autor



**Dr. O. Schedler**

Luftrettungsstation Senftenberg  
Ackerstraße 11, 01968 Senftenberg  
schedler-berlin@t-online.de

**Interessenkonflikt.** Es besteht kein Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor versichert, dass keine Verbindungen mit einer Firma, deren Produkt in dem Artikel genannt ist, oder einer Firma, die ein Konkurrenzprodukt vertreibt, bestehen. Die Präsentation des Themas ist unabhängig und die Darstellung der Inhalte produktneutral.

## Literatur

1. aerolite (2003) Operation and maintenance manual for helicopter model BK117 C-2 LOX system installation. 11: 4–32

**CME**.springer.de  
Zertifizierte Fortbildung für Ärzte

### Aktuelle CME-Beiträge für Sie zusammengestellt

Im CME.Center auf CME.springer.de stehen online über 250 aktuelle und mit jeweils 3 Punkten zertifizierte Fortbildungseinheiten zur Verfügung. Aus dem Bereich Notfallmedizin haben wir für Sie eine Auswahl aktueller CME-Beiträge zusammengestellt:

— Management des Massenanfalls von Verletzten/Erkrankten durch den Leitenden Notarzt von: B. Dirks	Haben Sie bereits <b>Notfall+Rettungsmedizin</b> abonniert? In diesem Fall ist die Teilnahme an den Fortbildungseinheiten Ihrer Zeitschrift für Sie im Abonnementpreis enthalten.
— Bewusstseinsstörung von: K. Ellinger, S. Krebs	Unabhängig von einem Zeitschriftenabonnement ermöglichen Ihnen CME.Tickets die Teilnahme an allen CME-Beiträgen auf CME.springer.de
— Präklinische Volumentherapie beim Trauma von: M. Raum, C. Waydhas	
— Leben retten nach den neuen Leitlinien von: V. Wenzel	

**Wählen Sie Ihre Wunschthemen aus und punkten Sie online!**

Bei Fragen hilft Ihnen unser Helpdesk unter [CME@springer.com](mailto:CME@springer.com) gerne weiter.

**CME.springer.de**